基于因子分析的简支梁桥损伤识别

王志宇,张素侠,刘习军

(天津大学机械工程学院,300072 天津)

摘　要:为了降低测量噪声对桥梁损伤检测结果的影响,提高检测方法在实际工程中的实用性,提出了一种基于因子分析的简支梁桥损伤识别方法。首先,对采集的位移信号进行因子分析,得到信号的公共因子和特殊因子,通过去除公共因子达到降噪目的。然后,采用统计方法和 D-S 证据理论对特殊因子进行处理并构造损伤指标。通过一个简支梁桥有限元模型的算例进行数值分析,讨论了噪声、车辆移动速度及质量对损伤识别产生的影响。结果表明:车速在 30~80 km/h 范围内时,所提方法可以准确定位较小程度的结构损伤;此外,噪声和载质量对识别结果影响较小,满足实际工况需求,说明所提方法具有很强的抗噪能力和实用价值。

关键词:简支梁桥;因子分析;D-S 证据理论;损伤识别

中图分类号:U447;TU317　　**文献标志码:**A

Damage identification of simply supported beam bridge based on factor analysis

WANG Zhiyu,ZHANG Suxia,LIU Xijun

(School of Mechanical Engineering,Tianjin University,300072 Tianjin,China)

Abstract: In order to reduce the influence of measurement noise on the detection results of bridge damage and improve the practicability of the detection method in practical engineering, a damage identification method of simply supported beam bridge based on factor analysis was proposed. Firstly, factor analyses of the collected displacement signals were made to obtain the common factors and special factors of the signals, and achieved the purpose of noise reduction by removing the common factors. Then, statistical methods and D-S evidence theory were used to process the special factors and construct damage indicators. The influences of noise, vehicle moving speed and vehicle mass on damage identification were explored through numerical analysis of a finite element model of a simply-supported beam bridge. The results showed that when the vehicle speed was in the range of 30-80 km/h, the method could accurately locate the structural damage with a small degree. In addition, the effect of noise and vehicle mass on the identification results was small, which met the requirements of the actual working conditions, indicating that the method had a strong anti-noise ability and practical value.

Key words: simply supported beam bridge; factor analysis; D-S evidence theory; damage identification

收稿日期:2021-10-13　　**修回日期:**2022-04-15

基金项目:天津市交通运输科技发展计划资助项目(No. 2019-15)

通信作者:张素侠,副教授。E-mail:zhangsux@ tju. edu. cn

引用格式:王志宇,张素侠,刘习军. 基于因子分析的简支梁桥损伤识别[J]. 应用力学学报,2022,39(4):732-741.

WANG Zhiyu, ZHANG Suxia, LIU Xijun. Damage identification of simply supported beam bridge based on factor analysis[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(4):732-741.

近年发展起来的基于结构振动的动力学损伤检测方法,因其具有操作简便、经济实用等优点,在结构损伤检测领域得到了广泛的应用。马爱敏等[1]建立了裂纹简支梁连续抗弯模型,并通过求解裂纹梁的动力指纹,包括固有频率、振型以及振型曲率,说明了基于动力指纹检测裂纹损伤的可行性。唐盛华等[2]利用结构损伤前后的柔度矩阵曲率范数差成功识别了连续梁桥的损伤。李雪艳等[3]将模式匹配法与结构的位移响应协方差参数变化比值相结合,对结构的损伤位置进行了识别。该方法无需结构模型,计算比较简便。

然而在实际工程中,结构的动态响应必然会受到噪声、温度等外界干扰信息的影响,甚至掩盖原本的损伤信息[4-5]。外界环境因素的影响已经限制了很大一部分损伤识别方法在具体工程中的实现。

为了减少噪声的影响,一些学者采用扩展卡尔曼滤波算法对信号进行处理。Sen 等[6]针对卡尔曼滤波算法在特定情况下受到噪声影响较大的问题,提出采用双扩展卡尔曼滤波技术对结构参数和状态进行同步估计,并通过数值模型证明了该方法的适用性。何浩翔等[7]将扩展卡尔曼滤波与静力凝聚法结合起来,利用静力凝聚法等效简化复杂梁桥的模型,然后采用扩展卡尔曼滤波成功识别了三跨连续梁桥的损伤。Lai 等[8]提出移动窗口的扩展卡尔曼滤波算法。相对传统算法而言,该方法对初始值不敏感,在损伤检测方面具有更强的鲁棒性,对系统参数的识别也更准确。虽然目前一些关于扩展卡尔曼滤波的研究可以在降低噪声干扰的影响下成功识别结构的损伤,但是由于方程中状态向量维数较大以及结构状态和参数向量之间的非线性耦合,计算比较繁琐,且容易出现不适定问题;所以要运用在实际工程中还需要进一步研究。

为了能够在未知噪声及其他环境因素的情况下降低其影响,部分学者提出采用主成分分析和因子分析等非参数化方法对数据进行处理。常鹏等[9]利用主成分分析法减少了温度对损伤特征参数的影响,并结合小波包变换构造损伤指标对结构进行损伤识别。Wah 等[10]认为结构振动特征参数的改变是结构损伤和环境因素的共同作用,并成功采用主成分分析法减小了环境因素的影响。刁延松等[11]提出了基于 AR 模型和因子分析的结构损伤识别方法。首先利用因子分析法降低温度对 AR 模型系数的影响,然后结合标准差控制图对结构进行损伤识别。然而,上述考虑环境因素的研究工作仅仅利用一些方法降低了环境因素对结构动力响应特征参数的影响,对后续的损伤识别方法并未做过多的研究,比较依赖于现有的方法,导致整个识别过程比较繁琐。

为了在降低噪声影响的同时提高检测方法的实用性,本研究提出了一种基于因子分析的简支梁桥损伤识别方法。首先,采用因子分析法将结构的位移响应分为公共因子和特殊因子两部分,通过去除公共因子来降低测量噪声的影响;然后,结合 D-S 证据理论,通过融合计算特殊因子的统计特征参数来构造损伤指标。数值算例中考虑了实际高速路况下的车速范围以及工程测量时的噪声强度大小。算例分析和模型实验的结果说明本研究所提方法不仅可以准确定位桥梁结构的损伤,而且在抵抗测量噪声方面具有很大的优势,有很强的实用价值。

1 因子分析

因子分析首先需要计算出各变量的均值和标准差来对变量进行标准化计算,然后通过计算标准化后变量的相关系数矩阵,将每一个样本的多个复杂变量表示成少数几个公共因子的线性组合与特殊因子之和。其中,公共因子代表同一样本所有变量包含的共同信息,而特殊因子则表示每一个变量所独有的信息。

对于一个 B 维数据 $\boldsymbol{X}$,假设其具有 l 个公共因子,则通过因子分析计算,可以将 $\boldsymbol{X}$ 表示为[12]

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\\vdots\\x_B\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_{11}&a_{21}&\cdots&a_{l1}\\a_{12}&a_{22}&\cdots&a_{l2}\\\vdots&\vdots&\cdots&\vdots\\a_{1B}&a_{2B}&\cdots&a_{lB}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}f_1\\f_2\\\vdots\\f_l\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\\varepsilon_2\\\vdots\\\varepsilon_B\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:$f_1, f_2, \cdots, f_l$ 为数据 $\boldsymbol{X}$ 的 l 个公共因子;a_{pj} 为第 p 个公共因子 f_p 在 $\boldsymbol{X}$ 的第 j 个分量 x_j 上的载荷;ε_j 为 x_j 的特殊因子。

式(1)也称为因子模型,可以将其写为

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{Af}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{2}$$

其中

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}a_{11}&a_{21}&\cdots&a_{l1}\\a_{12}&a_{22}&\cdots&a_{l2}\\\vdots&\vdots&\cdots&\vdots\\a_{1B}&a_{2B}&\cdots&a_{lB}\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{f}=[f_1,f_2,\cdots,f_l]^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\varepsilon}=[\varepsilon_1,\varepsilon_2,\cdots,\varepsilon_B]^{\mathrm{T}}$$

式中,$\boldsymbol{A}$ 为因子载荷矩阵。将式(2)写为特殊因子的表达式,即

$$\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{Af}-\boldsymbol{X} \tag{3}$$

从式(3)可以看出,只要计算出原始数据中每个分量的特殊因子,即可减少原始数据中公共因子的成分。而损伤检测过程中的噪声、温度等环境因素会对结构的整体产生影响,存在于数据的每个变量中,属于公共因子部分,所以通过提取特殊因子可以达到减少环境因素影响的目的[13-14]。

2 损伤指标的构建

采集移动荷载作用下桥梁结构 n 个测点的位移响应如下。

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix} y_1^1 & y_2^1 & \cdots & y_n^1 \\ y_1^2 & y_2^2 & \cdots & y_n^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_1^{n_t} & y_2^{n_t} & \cdots & y_n^{n_t} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中:n_t 为单个测点的采样点数;y_i^k 为结构在第 i 个测点采集的第 k 个时刻的位移响应。

本研究分两部分进行指标的计算。

1)以测点为样本,时间为变量的因子分析计算。

针对式(4),以测点作为样本,时间作为变量,可以得到 n 个样本及 n_t 个变量,对这种情况下的数据进行因子分析计算。为了满足因子分析的前提检验条件(KMO 和 Barttett 球度检验),可以采取删除某些相关性较强的变量的方法进行计算,最后提取出特殊因子 ε_1。该部分的特殊因子表示同一测点在不同时刻下响应的差异,其统计特征参数具有凸显损伤信息的能力。

第 i 个测点的特殊因子的方差 $V_{\mathrm{SF},i}$ 和峰度系数 $K_{\mathrm{SF},i}$ 分别为

$$V_{\mathrm{SF},i}=\frac{1}{n_t}\sum_{k=1}^{n_t}\left(\varepsilon_{1i,k}-\frac{1}{n_t}\sum_{k=1}^{n_t}\varepsilon_{1i,k}\right)^2 \tag{5}$$

$$K_{\mathrm{SF},i}=\frac{\frac{1}{n_t}\sum_{k=1}^{n_t}\left(\varepsilon_{1i,k}-\frac{1}{n_t}\sum_{k=1}^{n_t}\varepsilon_{1i,k}\right)^4}{V_{\mathrm{SF},i}^2}-3 \tag{6}$$

式中,$\varepsilon_{1i,k}$表示结构第 i 个测点第 k 个时刻位移响应的特殊因子。

当梁上各个相邻传感器之间的距离相等时,分别按照式(7)和式(8)计算相邻 2 个测点间特殊因子的方差变化率 S_{SFV} 和峰度系数变化率 S_{SFK} 的绝对值。

$$|S_{\mathrm{SFV},i}|=\left|\frac{V_{\mathrm{SF},i}-V_{\mathrm{SF},i+1}}{h}\right| \tag{7}$$

$$|S_{\mathrm{SFK},i}|=\left|\frac{K_{\mathrm{SF},i}-K_{\mathrm{SF},i+1}}{h}\right| \tag{8}$$

式中,h 为两相邻测点的间距。为了综合 S_{SFV} 和 S_{SFK} 的绝对值进行损伤识别,需要用 D-S 证据理论对其进行融合。

D-S 证据理论通过计算每个证据的基本概率分配函数(BPA),并结合 Dempster 合成规则来达到综合考虑多个证据并给出最终结果的目的。其中,BPA 也称为 mass 函数,用 m 表示。在损伤识别方面,可设所有识别结果组成的集合为 Θ,即辨识框架。若 A 为 Θ 的子集且相应的基本概率分配函数 $m(A)\neq 0$ 时,则称 A 为 m 的焦元。现有辨识框架下的 2 个证据分别为 F_1 和 F_2,对应的 mass 函数分别为 m_1 和 m_2,对应的焦元分别为 A_i 和 A_j,根据合成规则,可得融合后的证据集合 C 为

$$m(C)=\begin{cases} 0 & C=\varnothing \\ \dfrac{\sum\limits_{A_i\cap A_j=C}m_1(A_i)m_2(A_j)}{1-\sum\limits_{A_i\cap A_j=\varnothing}m_1(A_i)m_2(A_j)} & \forall C\subset\Theta, C\neq\varnothing \end{cases} \tag{9}$$

要融合 S_{SFV} 和 S_{SFK},需要计算二者的 mass 函数 m_1 和 m_2,把结构的每个测点 c_i 作为 D-S 证据理论的子集,则计算式为

$$m_1(c_i)=\frac{|S_{\mathrm{SFV},i}|}{\sum\limits_{i=1}^{n}|S_{\mathrm{SFV},i}|},m_2(c_i)=\frac{|S_{\mathrm{SFK},i}|}{\sum\limits_{i=1}^{n}|S_{\mathrm{SFK},i}|} \tag{10}$$

结合式(9)和式(10)对 S_{SFV} 和 S_{SFK} 的绝对值进行融合计算,将计算结果记为 D_1。

2)以时间为样本,测点为变量的因子分析计算。

对于式(4),以时间作为样本,测点作为变量,可得到 n_t 个样本及 n 个变量。对数据进行因子分析计算并提取相应的特殊因子 ε_2。这部分的特殊因子的含义为同一时刻结构在不同测点下响应的差异,其本身就含有结构的损伤信息。

第 i 个测点的特殊因子的偏度系数 $S_{\mathrm{SF},i}$可以表示为

$$S_{SF,i}=\frac{\frac{1}{n_t}\sum_{k=1}^{n_t}\left(\varepsilon_{2i,k}-\frac{1}{n_t}\sum_{k=1}^{n_t}\varepsilon_{2i,k}\right)^3}{\left[\frac{1}{n_t}\sum_{k=1}^{n_t}\left(\varepsilon_{2i,k}-\frac{1}{n_t}\sum_{k=1}^{n_t}\varepsilon_{2i,k}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (11)$$

各个测点的特殊因子的中位数用 SFM 表示。根据式(7)和式(8)的方法,可以计算出相邻 2 个测点间特殊因子的偏度系数变化率 S_{SFS} 以及中位数变化率 S_{SFM} 的绝对值。

同样地,结合式(9)对 S_{SFS} 和 S_{SFM} 的绝对值进行 D-S 融合计算,二者 mass 函数的算法与式(10)相同,将计算结果记为 D_2。

定义最终用于损伤检测的损伤指标 D_3 为数值 D_1 和 D_2 进行 D-S 证据融合后的数值的绝对值。

3 数值算例分析

3.1 算例模型

采用如图 1 所示的简支梁桥有限元模型进行数值动力分析计算。桥全长 24 m,全桥划分为 30 个单元,并在桥的下方均匀布置 9 个位移传感器。定义 1 号梁段为图 1 中从左向右第 1 个传感器和第 2 个传感器之间的部分(即单元 4 ~ 单元 6),其他梁段号以此类推,已在图 1 中标出。相关参数设置如下:弹性模量 $E=3.45\times10^{10}$ Pa,桥梁横截面积为 1.5 m^2,截面惯性矩 $I=0.281\ 25$ m^4,密度 $\rho=2\ 500$ kg/m^3,泊松比 $\lambda=0.2$。以弹簧质量块模型来模拟车辆荷载,质量块重 10 kN,弹簧的刚度系数为 1×10^7 N/m,车辆的行驶速度 $v=10$ m/s[15]。假定结构的损伤只与单元刚度变化有关,并通过单元刚度折减来模拟损伤。共设置 3 种损伤工况,具体如表 1 所示。

表 1 数值模拟的损伤工况

Tab. 1 Damage cases of numerical simulation

损伤工况	损伤单元号	损伤程度/%
1	16	5
2	24	5
3	14,24	5,5

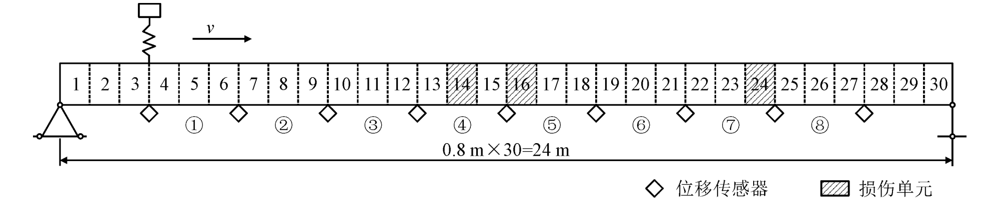


图 1 简支梁模型及加载方式示意图

Fig. 1 Schematic of the simply-supported bridge and loading mode

3.2 损伤识别结果

对采集到的位移信号分别以时间和测点作为样本进行因子分析计算,得到 2 种情况下的特殊因子,并采用本研究第 2 章的指标构造方法进行计算,得到损伤识别指标 D_3。本研究因子分析计算均通过 SPSS 软件进行。经过计算,本研究数值模型输出数据的 KMO 检验值均在 0.8 以上,适合做因子分析。此外,公因子数目的确定可根据特征值大于 1 以及方差累积解释大于 85% 的原则,最终确定的公因子个数为 2。

为了更好地表示出损伤位置,采用设置预警线的方式,计算方法如下[16]。

$$M_L>\frac{S}{N}\sum_{i=1}^{N}M_i \quad (12)$$

$$S_{max}=\frac{M_{max}}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}M_i},S_{min}=1 \quad (13)$$

式中:M_i 为第 i 段梁的损伤指标值;M_{max} 为各梁段损伤指标的最大值;N 为梁段总数;S 为安全系数。当式(12)成立时,认为第 L 段梁发生损伤。安全系数 S 越小判断条件越保守,其取值应该介于最大安全系数 S_{max} 和最小安全系数 S_{min} 之间。二者可以按照式(13)进行计算,本研究中的 S 取二者的中间值。

按上述方法计算出工况 1 和工况 2 下损伤指标的预警线,并绘出相应的损伤识别结果图,如图 2 所示。这 2 个工况均为单损伤工况,图 2(a)中 5 号梁的指标值较大,对应于 16 单元损伤,图 2(b)中 7 号梁的指标值较大,对应于 24 单元的损伤。识别结果与预设工况相符。

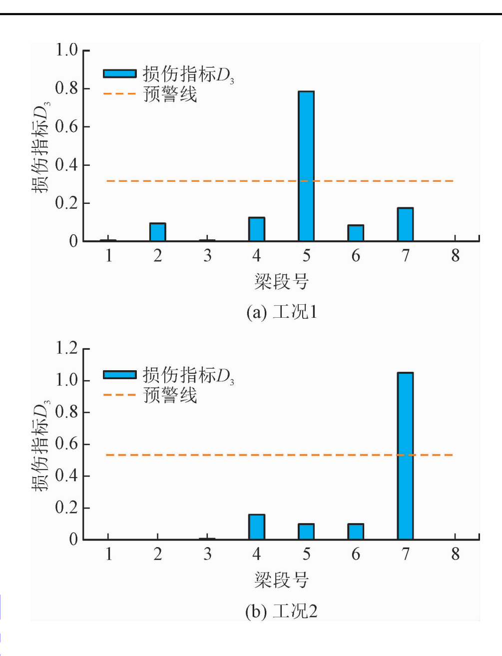


图 2　工况 1 和工况 2 的损伤识别结果

Fig. 2　Damage identification results of cases 1 and 2

为了更清晰地描述本研究方法的识别过程,下面以工况 3 为例进行说明。图 3 为跨中 5 号测点的位移响应,分别以时间和测点为样本,对所有测点的响应数据进行因子分析计算,可得各测点标准化后的公因子重构位移响应。用标准化后的位移响应减去公因子重构响应,即可得各测点的特殊因子。然后根据第 2 章的方法将不同情况下特殊因子的统计特征参数进行融合计算,计算结果如图 4 所示。其中,D_1为以测点为样本计算得到的值。可以看出,根据 D_1只能识别 7 号梁的损伤; D_2为以时间为样本的计算结果,虽然图 4（b）中 4 号梁和 7 号梁处的 D_2值都比较大,但是考虑到预警线的值,也只能判定 4 号梁一处损伤;图 4（c）为 D_1和 D_2融合后的识别结果,图中损伤梁段处的指标值 D_3均明显超过了预警线,所以能够根据 D_3准确判断出结构的损伤位置。

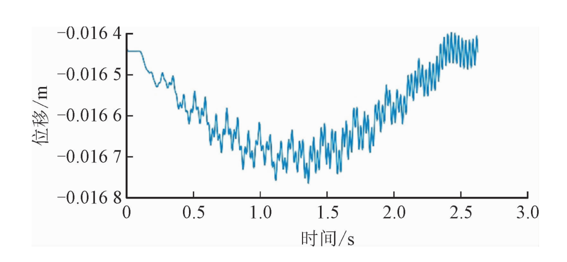


图 3　测点 5 的位移响应(工况 3)

Fig. 3　Displacement response of measuring point 5 (case 3)

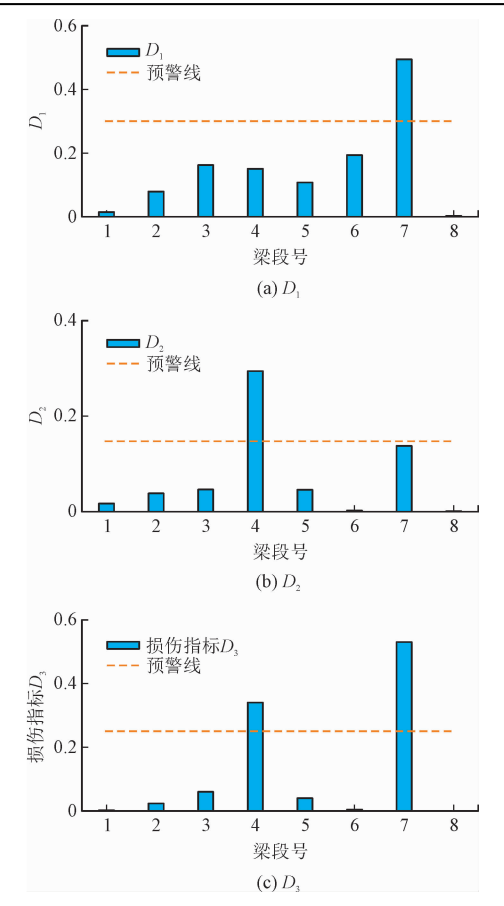


图 4　D_1、D_2、D_3的损伤识别结果(工况 3)

Fig. 4　Damage identification result of D_1, D_2 and D_3 (case 3)

3.3　噪声对损伤识别的影响

为了验证本研究所提方法的降噪效果,在结构的位移响应中添加高斯白噪声,其计算公式可表示为

$$y_{i,\text{noise}} = y_i + E_p N_{\text{noise}} \text{std}(y_i) \tag{14}$$

式中:$y_{i,\text{noise}}$为添加噪声后的动态位移响应;E_p 为噪声水平;N_{noise}为均值为 0,标准差为 1 的随机数序列;$\text{std}(y_i)$为位移响应的标准差。此外,这里添加的噪声是用来模拟测量噪声的,而不只是环境噪声,还包括路面粗糙度、不平顺等其他环境因素对响应造成的干扰。

以工况 2 为例,分别在响应中添加噪声水平为 10%、20%、30%的高斯白噪声,损伤识别结果如图 5 所示。可以看出,随着噪声强度的逐渐增大,未损伤梁段的损伤指标值也有所增加,但变化幅度较小且始终没有超过所设定的预警线,而损伤梁段(7 号梁)的指标值一直远超预警线,说明本研究所提出的损伤识别方法具有很好的噪声鲁棒性。

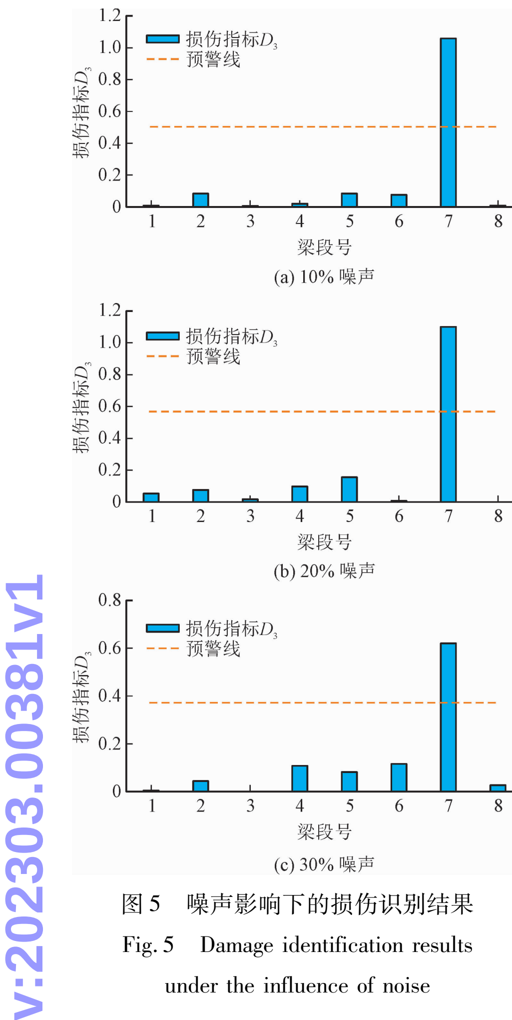


图 5　噪声影响下的损伤识别结果

Fig. 5　Damage identification results under the influence of noise

3.4　荷载移动速度对损伤识别的影响

不同荷载速度的作用下，桥面所受的激励不同，所采集到的动力响应信号也不同。为了研究荷载移动速度对损伤识别的影响，以工况 2 为例，将荷载的移动速度分别设为 8 m/s 和 12 m/s，并计算出相应的损伤指标 D_3。计算结果如图 6 所示。

对比图 2(b)与图 6 可以看出，虽然所提出的损伤识别方法在不同的荷载移动速度下均能准确识别损伤位置；但与图 2(b)和图 6(b)相比，图 6(a)中未损伤梁段的损伤指标更加接近预警线，对损伤识别的干扰程度较大。

为了进一步研究荷载速度对损伤识别的影响，定义除损伤位置外的其他节点处损伤指标最大的点为干扰点，并定义干扰点和损伤处的损伤指标的比值为干扰率，干扰率越大，说明识别效果越不理想。按照这种方法，计算出上述计算结果的干扰率。此外，为了探究干扰率与荷载移动速度之间的关系，并且考虑实际高速路桥的车速范围，增加计算荷载速度为 5 m/s、9 m/s、11 m/s、17 m/s、22 m/s、27 m/s 和 33 m/s 这几种情况下的干扰率。最后，为了研究噪声在这种情况下的影响，对每一个速度下的位移响应添加噪声水平为 30% 的高斯白噪声，并计算出相应的干扰率。为了便于观察规律，将上述计算结果绘成曲线图，如图 7 所示。

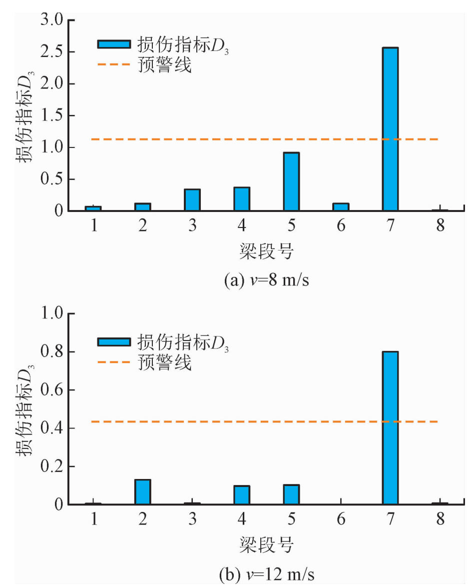


图 6　不同荷载移动速度下的损伤识别结果

Fig. 6　Damage identification results with different moving load speeds

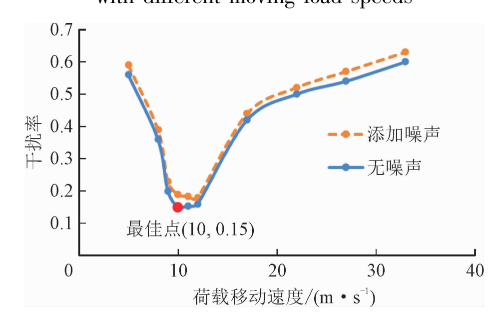


图 7　荷载移动速度干扰率曲线图

Fig. 7　Interference rate curves of moving load speed

从图 7 可以看出，无噪声的原始曲线中，干扰率最小的点(最佳点)对应的荷载速度值为 10 m/s，此时干扰率为 0.15。相对于该速度，速度过大或过小均会导致干扰率的增加，影响损伤识别效果甚至导致损伤误判。添加噪声后的干扰率曲线具有相同的规律，这也验证了本研究方法具有良好的噪声鲁棒性。

为了说明规律的普适性，对原桥梁有限元模型参数(即桥梁横截面积、材料密度、弹性模量等)进行修改，修改后的参数为：弹性模量 3.55×10^{10} Pa，密度 2 600 kg/m^3，泊松比 0.2，截面面积为 1.2 m^2，截面惯性矩为 0.144 m^4。在图 7 结果的基础上，增

加计算荷载速度为5 m/s、6 m/s、7 m/s、9 m/s、17 m/s、22 m/s、27 m/s 和 33 m/s 情况下的干扰率。计算结果如图 8 所示。

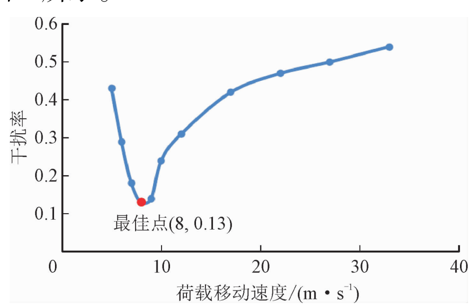


图 8　改变模型参数后的速度干扰率曲线图

Fig. 8　Interference rate curve of load speed after changing model parameters

对比图 7 和图 8 可以看出，荷载移动速度的干扰率确实存在上述总结的规律，只是最佳点的位置会发生变化。为了进一步总结采用本研究方法准确识别结构损伤的速度范围，再次改变桥梁有限元模型的结构参数，采用相同方法进行干扰率的计算。最后，综合这 3 种情况，给出进行损伤识别实验的建议速度范围为 8 ~ 22 m/s。

3.5　荷载质量对损伤识别的影响

荷载质量不同会引起桥梁所受激励的变化。为了研究移动荷载质量对损伤识别的影响，以工况 2 为例，在 3.2 节研究的基础上，增加计算车辆荷载为 3 t、5 t、7 t 和 9 t 情况下的损伤指标，并绘出相应的识别结果图。计算中车辆移动速度均设为10 m/s。最终的计算结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出，虽然随着荷载质量的增加，一些未损伤位置的指标值有所增大，但并没有引起误判，说明荷载质量对本研究提出的损伤识别方法影响较小。为了进一步研究荷载质量的影响规律，同样采用计算干扰率的方法绘出荷载影响下的干扰率曲线图，并在干扰率较小处适当加密计算，最终结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出，荷载质量对损伤识别的影响规律同荷载速度类似，即存在一个最佳载重值使得干扰率最小，数值过大或过小均会导致识别效果变差。不同之处在于，即使在荷载质量达到较大载重(9 t)的情况下，干扰率的值也小于 0.4，并不会导致损伤误判。为了验证这一规律的普适性，同样采用改变桥梁模型参数的方法，得到改变参数后荷载质量的干扰率曲线如图 11 所示。从前文识别结果可以看出，干扰率在 0.5 及其以下均不会导致损伤误判，所以综合图 10 和图 11 可以说明，对于不同的桥梁，荷载质量对损伤识别的影响较小，且存在上述总结的规律。

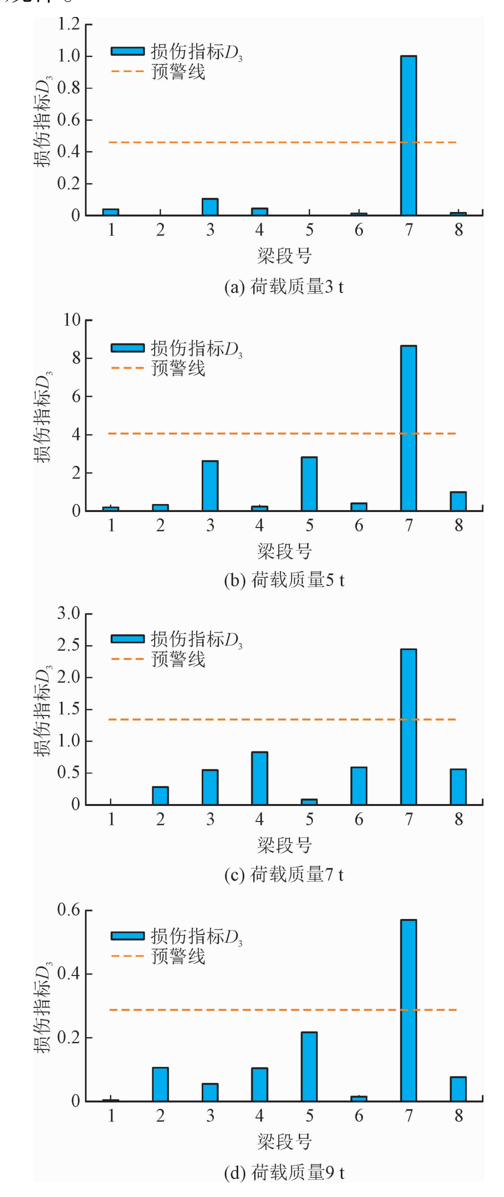


图 9　不同荷载质量下的损伤识别结果

Fig. 9　Damage identification results with different load mass

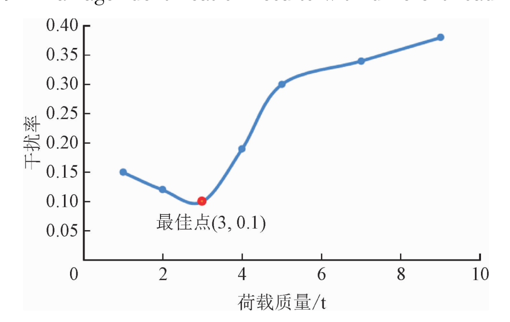


图 10　荷载质量干扰率曲线图

Fig. 10　Interference rate curve of load mass

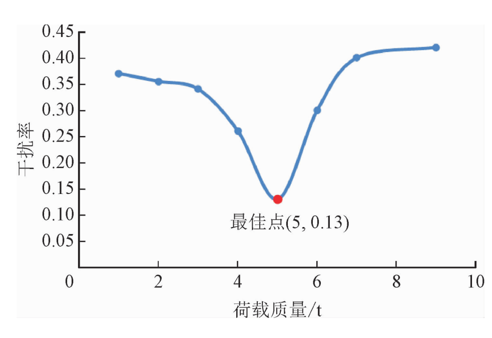


图 11 改变参数的荷载质量干扰率曲线图

Fig. 11 Interference rate curve of load mass after changing model parameters

4 实验验证

为验证本研究方法的有效性,利用简支梁桥模型进行实验。模型材料为有机玻璃(PMMA),密度为 1 201 kg/m^3,弹性模量为 3.75×10^9 Pa[17]。实验模型尺寸为 1.40 m×0.20 m×0.01 m(长×宽×高)。全桥共划分为 14 个单元,单元长度为 0.1 m,桥梁下方均匀布置 6 个测点。桥梁模型及测点布置简图如图 12 所示。梁段号的定义与第 3 章相同,已在图 12 中标出。

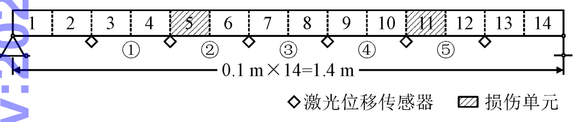


图 12 实验桥梁模型与测点布置示意图

Fig. 12 Schematic of experimental bridge model and measuring points

实验桥梁模型为环形桥的一部分,是一端固定一端简支的简支梁桥模型。沿模型长度方向均匀布置 6 个测点,每个测点下方放置一个激光位移传感器,用于结构位移响应的采集,所用的信号采集设备是 DHDAS 动态信号采集分析系统。具体的实验布置图如图 13 所示。



图 13 实验布置示意图

Fig. 13 Schematic of experimental set-up

对于实验采用的矩形截面梁,刚度的折减可以等效为桥面宽度的减小,所以实验中采用沿桥面宽度方向作对称切口来模拟损伤,本次实验采用宽度 $b=100$ mm 的切口,如图 14 所示。损伤程度根据截面惯性矩的变化来计算,而截面惯性矩的变化可以由这 2 个对称切口的深度之和 $2d$ 与桥面宽度的比值进行计算。共设置 2 种损伤工况,如表 2 所示。

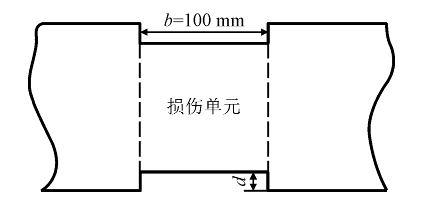


图 14 损伤单元示意图

Fig. 14 Schematic of damage unit

表 2 实验损伤工况

Tab. 2 Damage cases of experiments

损伤工况	损伤单元号	切口深度 d/mm	损伤程度/%
1	5	10	10
2	5,11	10,10	10,10

实验采用质量为 0.5 kg 的小车模型对桥梁进行激励,小车行驶速度为 0.4 m/s,采样频率为 200 Hz,采样时间为 4 s。对 2 种工况下采集到的位移响应采用本研究所提方法进行处理。经过计算发现,实验数据的 KMO 值也达到 0.8 以上,适合做因子分析。同样根据特征值大于 1 以及方差累积解释大于 85% 的原则,确定出公因子的数目为 2。最终的损伤识别结果如图 15 所示。

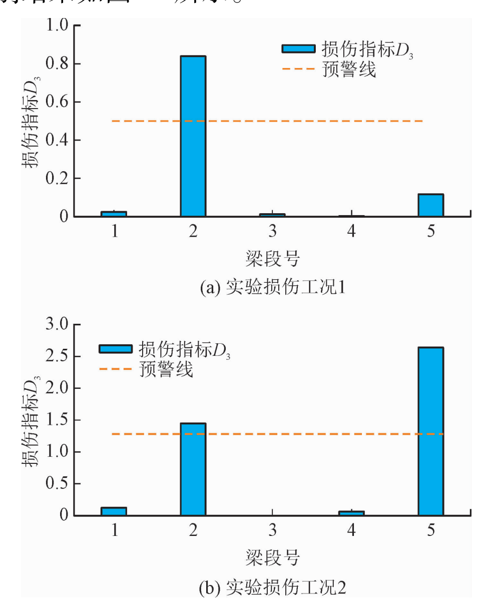


图 15 实验损伤识别结果图

Fig. 15 Damage identification results of experiments

图 15(a)中只有 2 号梁段的损伤指标明显超过预警线,对应于实验损伤工况 1 的 5 单元损伤;实验损伤工况 2 为多损伤工况。图 15(b)中,2 号梁段和 5 号梁段的指标值均超过了预警线,与预设的 5 单元和 11 单元损伤相符,实验结果与预设工况吻合程度较好。实验结果说明本研究所提方法具有一定的实用性和有效性。

5 结 论

本研究提出了一种在移动荷载作用下基于因子分析的简支梁桥损伤识别方法。该方法采用因子分析法对采集的位移响应进行降噪处理,并结合统计方法和数据融合方法来对桥梁结构的损伤进行定位。数值分析和模型实验均验证了该方法的有效性,并得到以下结论。

1)因子分析可以将采集的每一个响应数据分成公共因子和特殊因子两部分,测量噪声属于公共因子部分,通过提取响应的特殊因子可以有效降低噪声对损伤识别产生的影响。

2)研究了噪声、车辆移动速度及载质量对损伤识别产生的影响。研究的噪声强度范围为 10% ~ 30%,速度范围为 5 ~ 33 m/s,载质量范围为1 ~ 9 t,满足实际高速路况的需求。研究发现,噪声和载质量对识别结果的影响较小,而速度的影响较大。通过绘制干扰率曲线发现速度和载质量的影响规律相似。结合不同桥梁模型参数下的车速干扰率曲线,归纳出采用本研究方法可以准确定位结构微小损伤的建议速度范围为 8 ~ 22 m/s。

3)本研究方法只需要对桥梁结构施加移动车辆激励,并且适用的速度及载质量范围较大,便于实际操作。对于单处损伤和多处损伤,本方法均能实现准确定位,且具有很好的噪声鲁棒性,有一定的实用价值。

本研究方法依然存在一定的局限性,因为本研究不管是数值模拟还是实验验证,均采用简支梁桥的模型,对于其他类型桥梁的损伤识别仍待进一步研究。此外,本研究方法只能识别简支梁桥的损伤位置,从损伤识别结果也可以看出,本研究损伤指标并不能反映结构的损伤程度;所以,下一步还需要对结构损伤程度的量化进行研究。

参考文献:

[1] 马爱敏,张治君,李群. 基于连续抗弯刚度模型的裂纹梁动力指纹损伤识别[J]. 应用力学学报,2019,36(1):14-21.
MA Aimin,ZHANG Zhijun,LI Qun. Dynamic fingerprint damage identification method for cracked beams based on the continuous bending stiffness model[J]. Chinese journal of applied mechanics,2019,36(1):14-21 (in Chinese).

[2] 唐盛华,罗承芳,方志,等. 基于柔度矩阵曲率范数差的结构损伤识别方法[J]. 应用力学学报,2020,37(3):982-989.
TANG Shenghua, LUO Chengfang, FANG Zhi, et al. Structural damage identification method based on curvature norm difference of modal flexibility matrix[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(3):982-989(in Chinese).

[3] 李雪艳,赵志强,王立新. 基于位移响应协方差参数变化比和模式匹配的梁结构损伤识别方法研究[J]. 应用力学学报,2020,37(4):1784-1791.
LI Xueyan,ZHAO Zhiqiang,WANG Lixin. Study of structural damage identification based on covariance of displacement response and pattern matching method[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(4):1784-1791(in Chinese).

[4] HUYNH T C,PARK Y H,PARK J H,et al. Effect of temperature variation on vibration monitoring of prestressed concrete girders[J]. Shock and vibration,2015,(2):741618.

[5] PEETERS B,ROECK G D. One-year monitoring of the Z24 bridge: Environmental effects versus damage events[J]. Earthquake engineering & structural dynamics,2015,30(2):149-171.

[6] SEN S,BHATTACHARYA B. Progressive damage identification using dual extended Kalman filter[J]. Acta mechanica, 2016, 227(8):2099-2109.

[7] 何浩翔,吕永伟,韩恩圳. 基于静动力学凝聚及扩展卡尔曼滤波的连续梁桥损伤识别[J]. 工程力学,2015(7):156-163.
HE Haoxiang, LÜ Yongwei, HAN Enzhen. Damage detection for continuous bridge based on static-dynamic condensation and EKF[J]. Engineering mechanics, 2015 (7): 156-163 (in Chinese).

[8] LAI Z,LEI Y,ZHU S,et al. Moving-window extended Kalman filter for structural damage detection with unknown process and measurement noises[J]. Measurement,2016,88:428-440.

[9] 常鹏,王英剑,吴云峰,等. 基于主成分分析的温度敏感性结构损伤识别[J]. 振动工程学报,2019,32(2):234-240.
CHANG Peng,WANG Yingjian,WU Yunfeng,et al. Damage identification of temperature-sensitive structure based on principal component analysis[J]. Journal of vibration engineering,2019,32(2):234-240(in Chinese).

[10] WAH W S L,CHEN Y T,ROBERTS G W,et al. Separating damage from environmental effects affecting civil structures for near real-time damage detection[J]. Structural health monitoring,2018,17(4):850-868.

[11] 刁延松,任红. 基于 AR 模型和因子分析的结构损伤预警研究[J]. 振动与冲击,2014,33(18):115-119.
DIAO Yansong, REN Hong. Structural damage early warning based on AR model and factor analysis [J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(18): 115-119 (in Chinese).
[12] 李永江,刘春雨. 多元分析原理及应用[M]. 北京:经济科学出版社,2016.
[13] 吴森,韦灼彬. 基于小波包能量谱和因子分析的结构损伤识别方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2011,12(5):525-530.
WU Sen, WEI Zhuobin. Method of structural damage identification based on wavelet packet energy spectrum and factor analysis[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (natural science edition), 2011, 12(5): 525-530 (in Chinese).
[14] 闵志华,孙利民,王英. 基于因子分析和序贯概率比检验的结构损伤识别[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(1):295-303.
MIN Zhihua, SUN Limin, WANG Ying. Structural damage identification based on factor analysis and sequential probability ratio test [J]. Journal of Central South University (science and technology), 2015, 46(1): 295-303 (in Chinese).
[15] 高耀东. 有限元理论及 ANSYS 应用[M]. 北京:电子工业出版社,2016.
[16] 王晓春. 基于提升小波变换的简支梁损伤识别方法研究[D]. 天津:天津大学,2016.
[17] 刘光耀,刘习军,张素侠,等. 基于小波分析和变异系数的简支梁桥损伤识别[J]. 应用力学学报,2020,37(5):1915-1922.
LIU Guangyao, LIU Xijun, ZHANG Suxia, et al. Damage identification of simply supported beam bridge based on wavelet analysis and variation coefficient [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(5): 1915-1922 (in Chinese).

(编辑　黄崇亚)

(上接第 731 页)

[15] ERINGEN A C, EDELEN D G B. On nonlocal elasticity[J]. International journal of engineering science, 1972, 10(3): 233-248.
[16] 徐长节,丁海滨,童立红,等. 基于非局部 Biot 理论下饱和土中深埋圆柱形衬砌对平面弹性波的散射[J]. 岩土工程学报,2018,40(9):1563-1570.
XU Changjie, DING Haibin, TONG Lihong, et al. Scattering waves generated by cylindrical lining in saturated soil based on nonlocal Biot theory[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2018, 40(9): 1563-1570 (in Chinese).
[17] 王士革,牛洁楠,刘林超. 分数导数黏弹性模型描述的土中管桩竖向振动的频域解[J]. 力学季刊,2018,39(4):792-803.
WAND Shige, NIU Jienan, LIU Linchao. Vertical vibration of pipe pile in soil described by fractional derivative viscoelastic model [J]. Chinese quarterly of mechanics, 2018, 39(4): 792-803 (in Chinese).

(编辑　黄崇亚)